

非均匀大气中单幅退化图像复原

武鹏飞^{1,2}, 方 帅³, 徐青山¹, 饶瑞中¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230039)

摘 要: 利用大气非均匀路径中的图像退化光学模型建立了一种非均匀大气中退化图像复原的新方法. 首先估计得到图像中各目标倾斜方向对应的观测处天空背景亮度, 然后根据暗原色先验知识估计出图像中场景目标的粗糙相对距离, 重点得到了退化模型中反映视线路径非均匀性的比例因子项, 进而得到了成像路径中的大气透过率, 最后利用得到的这些参量通过非均匀路径退化模型的逆过程对降质图像进行复原. 实验结果表明, 复原算法对实际采集得到的户外自然退化图像复原效果较好.

关键词: 图像复原; 非均匀大气; 图像退化; 光学模型

中图分类号: TP399 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 10-1895-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.004

Single Image Dehazing in Inhomogeneous Atmosphere

WU Peng-fei^{1,2}, FANG Shuai³, XU Qing-shan¹, RAO Rui-zhong¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230039, China)

Abstract: A new method for the restoration of degraded images in inhomogeneous atmosphere was proposed using the optical model of image degradation in inhomogeneous path. Firstly, Sky radiances at observer corresponding to the slant directions of each object in image were estimated. Then, based on the prior knowledge of dark channel, the rough relative distances of scene objects in image were estimated approximately, and as a key point, the ratio factor which reflects the inhomogeneous property of visual path in the degradation model was obtained, and subsequently atmospheric transmittance of imaging path was computed. Finally, using these parameters computed above, the degraded image can be restored by the inverse process of the optical degradation model. The experimental results show that the new algorithm is effective for actual outdoor degraded images.

Key words: image dehazing; inhomogeneous atmosphere; image degradation; optical model

1 引言

图像在经过大气传输时, 由于受到大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射, 图像质量会受到严重影响^[1], 这极大限制了各种户外机器视觉系统的应用, 诸如: 交通监控系统、自动导航系统以及卫星遥感探测系统等. 目前, 大气中退化图像复原的方法主要包括基于模型的方法和非模型的方法. 前者首先依据大气中图像退化的物理机制建立光学退化模型, 然后利用退化模型通过逆过程对降质图像进行复原. 而非模型的方法并不考虑图像退化的物理机制, 仅依赖于图像本身, 属于图像增强, 并不是真正意义的图像复原, 目前应用较广泛的非模型方

法主要有直方图均衡化^[2]和 Retinex^[3,4]方法两类.

基于模型的方法依据分析的角度不同, 分成了两个不同的研究方向, 分别是空间频域和空域的角度对大气中图像的退化过程进行分析, 建立图像退化的光学模型, 然后利用模型通过逆过程对降质图像进行复原. 20 世纪 70 年代, Lutomirski^[5]利用随机介质中的光传播理论从空间频域的角度分析了图像在大气中的传输问题, 认为大气造成图像模糊的过程是原始图像和大气点扩展函数的卷积, 并在小角散射近似 (Small Angle Approximation, SAA) 下得到了大气点扩展函数的傅里叶变换的模—调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 的数学解析表达. 20 世纪 90 年代, Sadot 和 Kopeika 等^[6-8]

利用实测大气参数和图像采集系统参数对大气 MTF 进行预测,并利用得到的 MTF 通过解卷积过程对模糊图像进行复原.然而,该方法基于 SAA 获得的解析结果,其仅仅适用于稀疏介质在很低空间频率的狭小范围,并不能反映各种混浊介质在全部空间频域内的整体 MTF 特征^[9],因此对于该方法预测的大气 MTF 精度值得进一步探讨.值得关注的是,最近 Rao^[9]根据混浊介质的 MTF 与均匀各向同性漫射光照射下混浊介质的出射光之间的等效原理,给出了大气混浊介质 MTF 在整个空间频域内的一般特征,这将为研究空间频域内退化图像的复原给出很有价值的启示.

在假定观测视线路径中的环境光照以及大气介质的光学特性均相同的情况下,McCartney^[10]提出了基于目标光直接透分量与天空散射光分量的图像退化光学模型,认为图像中每一像元的亮度值为目标固有亮度经过大气路径后的直接透分量与观察视线光路上天空散射光分量的叠加.目前,依据该退化模型或其变形形式,发展出了许多图像复原方法^[11-17],并得到了较好的复原效果.该光学退化模型基于一个重要的假设,即观测视线路径中的照度以及光学特性是均匀不变的,然而,在斜程观测情况下,视线路径中的光照和光学性质是非均匀的,即使在水平路径中,实际大气条件也大多是非均匀的^[18].因此,大气非均匀路径图像退化光学模型^[19]的建立由于考虑了成像路径中光照和大气介质光学特性的非均匀性,因此更好地描述了非均匀路径中图像退化的物理机制,对指导退化图像的复原具有重要意义.

本文依据大气非均匀路径中的图像退化光学模型,建立了一种新的大气中降质图像复原方法,有效地考虑了成像路径中的非均匀性,利用该方法对实际采集得到的户外自然图像进行了恢复处理,并与其他复原方法做了对比分析.本文后续的结构组织如下:第2节对大气非均匀路径图像退化光学模型做简要介绍;第3节详细地描述本文提出的算法;第4节给出实验结果以及与其他方法结果的对比;第5节为全文结论,并说明本文算法的限制.

2 大气非均匀路径图像退化光学模型

依据大气中图像退化的物理机制,文献^[19]给出了大气非均匀路径中图像退化的光学模型,表示如下:

$$I_{\text{vis}}(\tau_v) = I_{\text{obj}}(\tau_o) T_s(\tau_o, \tau_v) + I_{\text{back_vis}}(\tau_v) [1 - \chi(\tau_o, \tau_v) * T_s(\tau_o, \tau_v)] \quad (1)$$

式(1)表示从高度为 τ_v 的位置观察高度为 τ_o 的目标.其中, τ_v 和 τ_o 表示由大气上界向下测量的垂直光学厚度,为大气介质消光系数 $\beta_{\text{ext}}(z)$ 沿垂直路径的积

分, $\tau = \int \beta_{\text{ext}}(z) dz$; $I_{\text{obj}}(\tau_o)$ 为目标固有亮度; $I_{\text{back_vis}}(\tau_v)$ 为观测处的天空背景亮度; $T_s(\tau_o, \tau_v) = \exp[-\frac{|\tau_v - \tau_o|}{\mu}]$, 为非均匀视线路径中的大气透过率,其中 $\mu = \cos\theta_v$, 表示视线路径相对于垂直方向的倾角 θ_v 的余弦值; $\chi(\tau_o, \tau_v) = \frac{I_{\text{back_obj}}(\tau_o)}{I_{\text{back_vis}}(\tau_v)}$ 为比例因子,其中 $I_{\text{back_obj}}(\tau_o)$ 表示目标处的天空背景亮度.

水平均匀路径中图像退化光学模型^[10]目前已得到广泛应用,其数学描述为:

$$I_{\text{vis}}(\tau_v) = I_{\text{obj}}(\tau_v) T_h(\tau_v) + I_{\text{back_vis}}(\tau_v) [1 - T_h(\tau_v)] \quad (2)$$

可以看出,与均匀路径退化模型相似,非均匀路径退化模型同样表示图像中目标的亮度为目标固有亮度经过大气路径后的直接透分量(式(1),(2)中第一项)与视线光路上天空散射光分量(式(1),(2)中第二项)的叠加.

此外,非均匀路径退化模型主要存在以下三个特点:(1)非均匀路径中的大气透过率 T_s 不能简单地由 $\exp[-\beta_{\text{ext}}L]$ 表示,因为此时 $\beta_{\text{ext}}(l)$ 在视线路径中是非均匀的,不能再看作一个常数;(2)式(1)第二项中 χT_s 为非均匀路径透过率 T_s 乘以一个比例因子 χ ,不同于均匀路径退化模型中单一的均匀路径透过率 T_h ;(3)式(1)第二项中的 $I_{\text{back_vis}}(\tau_v)$ 表示观测处目标倾斜方向上的大气背景亮度,如果成像场景中有多多个不同方向的物体,则该项对应于不同倾斜方向上的亮度值,而在均匀路径的图像退化模型中,该项为水平方向的天空背景亮度,在图像恢复处理中,对于整幅图像,将其看作一个全局常量.

3 非均匀大气中退化图像复原

3.1 图像复原模型

利用非均匀路径中的图像退化光学模型,可以得到 RGB 颜色空间中用来进行退化图像复原的公式:

$$I_{\text{obj}} = \frac{I_{\text{vis}} - I_{\text{back_vis}}}{T_s} + \chi I_{\text{back_vis}} \quad (3)$$

式中 I_{obj} , I_{vis} 和 $I_{\text{back_vis}}$ 为 RGB 颜色空间向量.由式(3)可以看出,要得到目标固有亮度 I_{obj} , 需要求得的参量有:观测处目标的亮度 I_{vis} , 即为图像传感器接收到的亮度,为已知量;观测处对应于目标倾斜方向的大气背景亮度 $I_{\text{back_vis}}$; 比例因子 χ ; 非均匀路径透过率 T_s . 在得到上述参量后,便可通过式(3)对退化图像进行复原.各参量的求解将在下面各小节中给出.

需要说明的是,比例因子和大气透过率理论上均依赖于波长^[19],即

$$\{\chi, T_s\} = \{\chi(\lambda), T_s(\lambda)\}$$

而在式(3)中作了一个基本假设,即对于不同波长,比例因子和大气透过率是相同的.对于透过率,该假设已经在图像处理领域中广泛作为先验假设条件^[11-17],但尚未有研究者对该假设在对于复原结果的影响以及当考虑不同波段透过率不同时的复原问题方面做出讨论.

3.2 观测处天空背景亮度 I_{back_vis}

对于观测处天空背景亮度的估计,在基于均匀路径图像退化模型的复原方法中,存在不同的处理方式.例如,文献[13]将输入图像中最大亮度值作为观测处的天空背景亮度;文献[15]首先对整幅图像的暗原色强度从高到低进行排序,然后选择排序后强度为第 0.1% 的像素集,最后在降质图像中,从选取的像素集中选择亮度最大值作为观测处的天空背景亮度;文献[17]首先从图像中分离出天空区域,然后在天空区域选取亮度最大值作为观测处天空背景亮度.这些方法的一个不足之处在于将整幅图像的天空背景亮度看作一个全局常量.然而,根据本文对非均匀路径中图像退化光学模型的分析可知,如果成像场景中有多多个不同方向的物体,则对应于不同倾斜方向上的天空背景亮度,不同倾斜方向在图像中对应于不同行,因此本文采取的方法是:对于输入图像中包含有天空区域的图像行,针对每一行采用文献[15]中的方法,即:首先对该行所有像素的暗原色强度从高到低排序,然后选择排序后强度为第 $n\%$ 的像素集,最后在降质图像中,从选取的像素集中选择亮度最大值作为观测处的天空背景亮度,即:

$$I_{back_vis}^{i,sky} = I_{n\%}^{i,sky} \quad (4)$$

其中, i 表示图像中第 i 行,参数 n 取决于图像行的大小,本文实验中取 2.

对于不含有天空区域的图像行,将距离最近的已经得到天空背景亮度的图像行的值作为该图像行的观测处天空背景亮度,即有:

$$I_{back_vis}^{i,object} = I_{back_vis}^{i,sky} \{ \min(|i-j|) \} \quad (5)$$

图 1(b)中离散点表示对输入图像中含有天空区域的行(如图 1(a)中红框所示)求得的 RGB 三通道观测处天空背景光 $I_{back_vis}^{i,sky}$,其中,输入图像的灰度级范围已预先处理为(0,1)区间.为了减小因逐行求天空背景光而造成复原结果中存在的块效应,本文对结果进行线性平滑,平滑后的 RGB 三通道天空背景光如图 1(b)中直线所示.

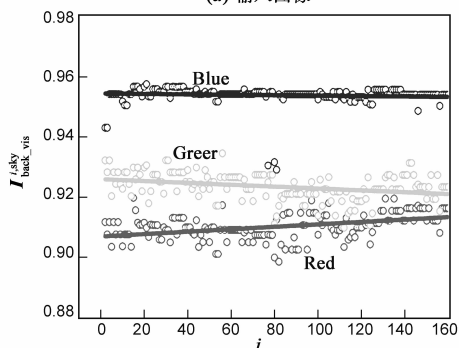
3.3 比例因子 χ

对于比例因子 χ 的求解,首先根据应用广泛、精度较高的大气辐射传输软件 MODTRAN4.0^[20](处理多次散射采用 DISORT 算法^[21])得到的大量仿真计算结果建立简化模型,然后通过暗原色先验知识^[15]求解成像场

景中目标间的粗糙相对距离,最后根据建立的模型以及得到的目标相对距离具体计算比例因子.



(a) 输入图像



(b) 天空背景光平滑

图1 观测处天空背景光平滑结果

3.3.1 比例因子简化模型

图 2 是利用大气辐射传输软件 MODTRAN4.0 仿真计算得到的 $0.7\mu\text{m}$ 波长上比例因子 χ 在一种典型大气条件下不同能见度状况下随目标俯仰角、观测距离的变

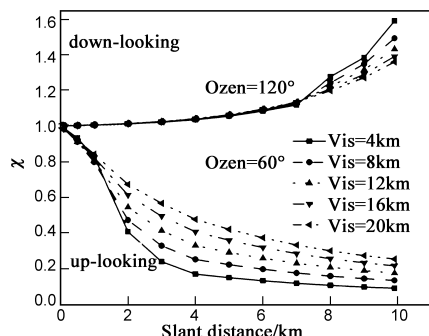
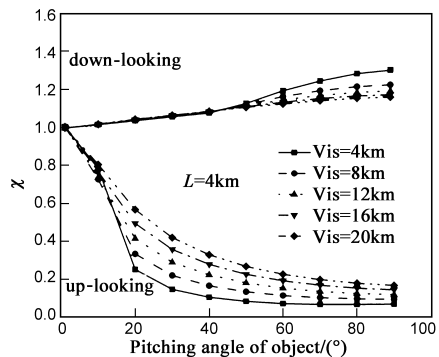


图2 χ 与目标俯仰角、观测距离的关系

化关系.具体计算参数为:中纬度夏季大气模式,乡村型气溶胶,耕地型地表,太阳天顶角 $Szen = 30^\circ$, 视线方位相对于太阳方位 $\Delta\varphi = 180^\circ$, 考虑两种观测方式:(1)自地面向上观测;(2)自 5km 高度向下观测.

由图 2 可以看出,比例因子 χ 随目标俯仰角和观测距离的变化关系近似遵循指数规律.通过对大量不同大气光学参数和观测几何进行仿真计算,发现在典型大气和观测条件下, χ 随两者的变化关系依然近似满足该规律^[19],取如下简化关系式近似表示这种变化趋势:

$$\chi = \exp(\alpha\theta L) \quad (6)$$

式中, α 是与成像时刻的大气光学特性有关的量,对于整幅图像看作一个全局常量, θ 为目标俯仰角, L 为目标与观测者之间的距离.

3.3.2 目标相对距离

在具体求解求比例因子 χ 时,需要已知目标间的相对距离,本文利用暗原色先验知识^[15]来求目标相对距离.暗原色先验知识是通过对大量户外清晰自然图像的观察统计得到的,在图像中非天空区的局部区域中,对于 RGB 颜色通道,至少有一个颜色通道的强度非常低,称为暗通道,当有雾霾等存在时,暗通道的亮度值主要由视线路径中的天空散射光决定,即满足下式:

$$\min_{y \in \Omega(x)} [I_{vis}^c(y)] = I_{path}^c(x) \quad (7)$$

$c \in \{r, g, b\}$

式中 $\Omega(x)$ 是以像素点 x 为中心的局部小区域, c 表示 RGB 颜色通道.

根据暗原色先验知识,在式(7)中用 $I_{back_vis}^c \{1 - \chi * T_s\} = I_{back_vis}^c \{1 - \exp[(\alpha\theta - \beta_{ext})L]\}$ 代替 I_{path}^c , 则可以得到:

$$(\alpha\theta - \beta_{ext})L = \ln \left\{ 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{I_{vis}^c(y)}{I_{back_vis}^c} \right] \right\} \quad (8)$$

$c \in \{r, g, b\}$

对于同一倾斜方向的两个不同距离的目标点,根据上式可以得到相对距离 k :

$$k = \frac{L_1}{L_2} = \frac{\ln \left[1 - \min_{y_1 \in \Omega(x_1)} \left(\frac{I_{vis_1}^c(y_1)}{I_{back_vis}^c} \right) \right]}{\ln \left[1 - \min_{y_2 \in \Omega(x_2)} \left(\frac{I_{vis_2}^c(y_2)}{I_{back_vis}^c} \right) \right]} \quad (9)$$

$c \in \{r, g, b\}$

式中, $I_{vis_1}^c(y_1)$ 和 $I_{vis_1}^c(y_2)$ 分别表示像素 x_1, x_2 对应的局部小区域 $\Omega(x_1)$ 和 $\Omega(x_2)$ 内像素的亮度值.

需要说明的是,对于非均匀路径,利用上述方法求得的相对距离并不精确,因为该方法中假定 β_{ext} 是常量,没有考虑路径中光学性质的非均匀性.但是对于本文算法,得到粗糙的相对距离已能够满足算法的有效性.

3.3.3 比例因子求解

下面对式(6)进行分析处理,给出求解比例因子 χ 的具体方法.图 3 表示不同观测方式(向上、向下和水平观测)的成像几何示意图.

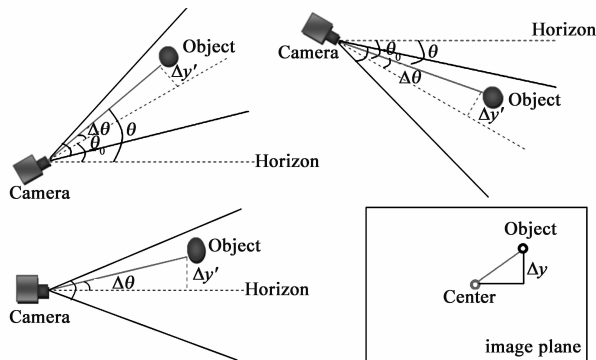


图3 不同观测方式的成像几何示意图

由图 3 可以看出,图像中不同倾斜方向的目标与水平方向的夹角,即俯仰角表示为:

$$\theta = \theta_0 \pm \Delta\theta = \theta_0 \pm \text{atan} \frac{\Delta y}{f} \quad (10)$$

式中, θ_0 为观测视线方向与水平方向的夹角,当水平观测时, $\theta_0 = 0$, $\Delta\theta$ 为目标倾斜方向与观测视线方向的夹角, Δy 为图像中目标点与中心点之间垂直方向的距离, f 为成像装置的焦距.当像素位于图像中心之上时,式(10)中取正号,反之则取负号.

图 4 为不同距离目标的成像几何示意图.

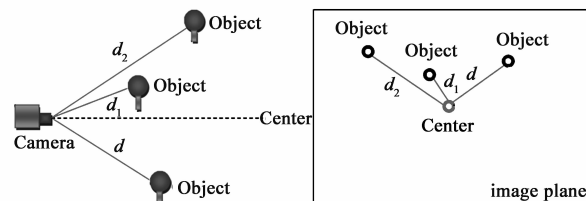


图4 不同距离目标的成像几何示意图

根据大量仿真计算结果发现,不同观测距离处(如图 4)的比例因子 χ 是不相同的,当观测距离较小时, χ 近似为 1^[19].因此,本文在图像中选取距离成像装置最近的一点,并将其比例因子 χ_{max} 近似为 1.图像中任一目标与最近点的比例因子的比值为:

$$\frac{\chi}{\chi_{max}} = \frac{\exp(\alpha\theta L)}{\exp(\alpha\theta L_{min})} = \exp[\alpha\theta(L - L_{min})] \quad (11)$$

根据式(9)有:

$$L - L_{min} = (k - 1)L_{min} \quad (12)$$

由式(10) - (12)可得:

$$\chi = \exp \left\{ \alpha \left[\theta_0 \pm \text{atan} \left(\frac{\Delta y}{f} \right) \right] * (k - 1)L_{min} \right\} \quad (13)$$

式(13)可写为两个指数项乘积的形式:

$$\chi = \exp[\alpha\theta_0(k-1)L_{\min}] * \exp\left[\alpha \operatorname{atan}\left(\frac{\Delta y}{f}\right) * (k-1)L_{\min}\right] \quad (14)$$

式(14)中前一指指数乘积项表示由于相机倾斜观测和成像场景中目标距离较远造成必须要考虑视线路径的非均匀性,后一指指数乘积项表示由于相机本身具有一定的视场角和成像场景中目标距离较远造成视线路径的非均匀性必须要考虑.这里简单讨论两种特殊情况下比例因子 χ 的表达形式:

(1)当观测视线沿水平方向时,满足 $\theta_0 = 0$,式(14)中前一指指数乘积项消失,简化为:

$$\chi = \exp\left[\alpha \operatorname{atan}\left(\frac{\Delta y}{f}\right) * (k-1)L_{\min}\right] \quad (15)$$

(2)对于小视场角观测,满足 $\operatorname{atan}\frac{\Delta y}{f} \approx \frac{\Delta y}{f}$,式(14)可简化为:

$$\chi \approx \exp[\alpha\theta_0(k-1)L_{\min}] * \exp\left(\alpha\left(\frac{\Delta y}{f}\right) * (k-1)L_{\min}\right) \quad (16)$$

由式(13)和(14)可以看出,要求得比例因子 χ ,关键是要得到 α 和 L_{\min} .下面将给出求解方法.

对于距离成像装置较近的目标,其位置处的天空背景亮度可近似为观测处的天空背景亮度与视线路径中的天空散射光之差,即假设较近目标处的天空背景亮度在到达观测点时经过的衰减相对于本身是较小的,同时根据暗原色先验知识,有:

$$I_{\text{back_obj}}^c(L_{\min}) \approx I_{\text{back_vis}}^c - I_{\text{path}}^c(L_{\min}) \quad (17)$$

因此,此处的比例因子为:

$$\chi(L_{\min}) = \frac{I_{\text{back_obj}}^c(L_{\min})}{I_{\text{back_vis}}^c} \approx \frac{I_{\text{back_vis}}^c - I_{\text{path}}^c(L_{\min})}{I_{\text{back_vis}}^c} \quad (18)$$

考虑到目标处的天空背景亮度为一个近似值,且被过低估计,使得比例因子 $\chi(L_{\min})$ 偏小,因此在式(18)中引入一个常量 ϵ 进行修正, ϵ 的取值根据经验确定,一般情况下采集图像时能见度越高,选取的“最近点”越近, ϵ 值越小,反之越大,通常在 $1 < \epsilon < 2$ 中取值:

$$\tilde{\chi}(L_{\min}) = \epsilon \cdot \frac{I_{\text{back_obj}}^c(L_{\min})}{I_{\text{back_vis}}^c} \quad (19)$$

根据式(6)和(19)则可求得:

$$\alpha L_{\min} = \frac{\ln \tilde{\chi}(L_{\min})}{\theta(L_{\min})} \quad (20)$$

取 $\alpha' = \alpha L_{\min}$,则式(13)可简化为:

$$\chi = \exp\left\{\alpha' \left[\theta_0 \pm \operatorname{atan}\left(\frac{\Delta y}{f}\right)\right] * (k-1)\right\} \quad (21)$$

由式(21)可知,在图像处理时并不需要知道所选最近点的实际距离,而是把 αL_{\min} 看作一个整体未知量 α' ,根据式(20)可求得.在得到 α' 后,最后由式(21)则可求

得比例因子 χ ,如图 5(b)所示.

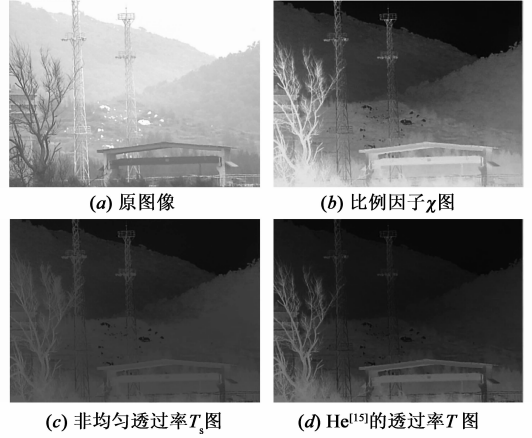


图5 比例因子 χ 和非均匀路径透过率 T_s

3.4 非均匀路径透过率 T_s

在式(7)中用 $I_{\text{back_vis}}^c(1 - \chi T_s(x))$ 代替 I_{path}^c 可以得到:

$$T_s(x) = \left\{ 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{I_{\text{vis}}^c(y)}{I_{\text{back_vis}}^c} \right] \right\} * \frac{1}{\chi} \quad (22)$$

上式即可估计得到非均匀路径大气透过率 $T_s(x)$,如图 5(c)所示,同时给出通过 He^[15]方法得到的大气透过率,如图 5(d)所示.从图中可以看出,两种方法得到的透过率均体现出输入图像的场景结构信息,但两者存在差别,主要是因为两者均通过暗原色先验求解,从公式上看 He 透过率为本文透过率与比例因子的乘积,由于比例因子贡献了一部分变化,从而使得透过率相对平滑.此外,由于本文采用逐行求天空背景亮度的方法代替全局常量假设,因此对于透过率表现更好.

4 实验结果与分析

利用本文算法,对实际采集得到的户外自然退化图像进行恢复处理,同时与其他算法结果进行对比分析.在执行本文算法和 He 算法之前,首先对输入图像进行白平衡操作.同时,为了便于比较,使不同算法对同一场景的处理结果在平均亮度上保持一致,即对于 RGB 彩色图像,使其在 HSI 颜色空间中平均亮度分量 I 满足: $\operatorname{Aver}_{x,y}\{I\} = \operatorname{Aver}_{x,y}\left\{\frac{(R+G+B)}{3}\right\} = \operatorname{const}$,这消除了因各幅图像亮度的不同所造成的视觉上对比度的差异.

图 6 和图 7 分别为对仰角为 1° 和 2° 的远距离山体背景图像的处理结果,图 8 和图 9 分别为对仰角为 5° 和 10° 的城区图像处理结果.其中原图像中小方框代表所选最近点,图 6 和图 7 中参数 ϵ 分别设为 $\{1.5, 1.6\}$,图 8 和图 9 中均为 $\{1.4\}$.由结果可以看出,本文方法能够恢复得到清晰的场景细节,同时与 Tarel 和 He 方法的结果比较后发现,从视觉效果上看,本文算法得到的复原

图像更加清晰,如图 6 中第一幅图像的红、蓝框架结构和山体,图 7 中第一幅和第二幅图像的山顶塔和山体,图 8 和图 9 中的远处楼房等等,这主要是因为,在实际户外场景中,由于大气条件的局域性和下垫面的复杂性(通常为复合地表类型),对于远距离和非水平成像,

视线路径中的环境光照和大气介质特性不可避免地变成非均匀的,这就造成依赖于水平均匀路径光学退化模型的复原方法存在一定的局限,复原结果不够理想,正因如此,这就体现了非均匀路径退化模型的优越性,以及基于该模型的本文复原算法的有效性.

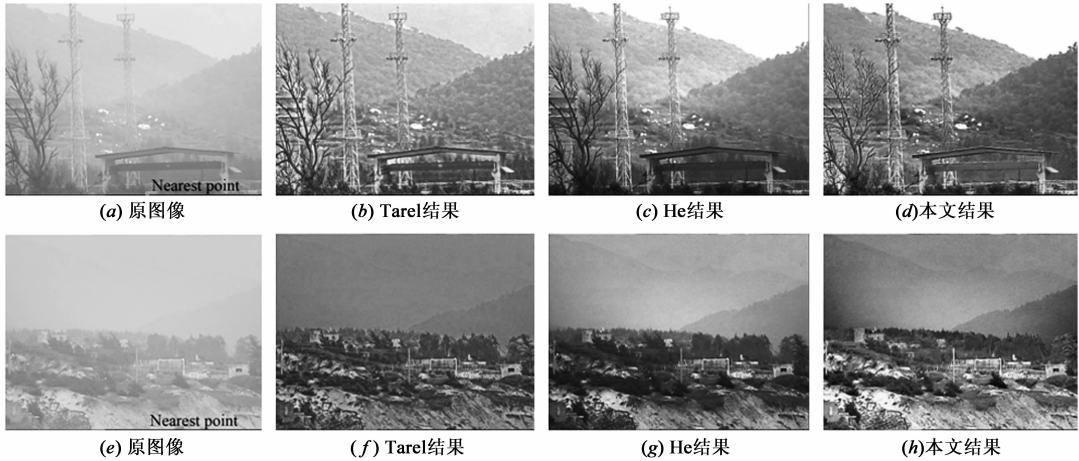


图6 第一组实验结果

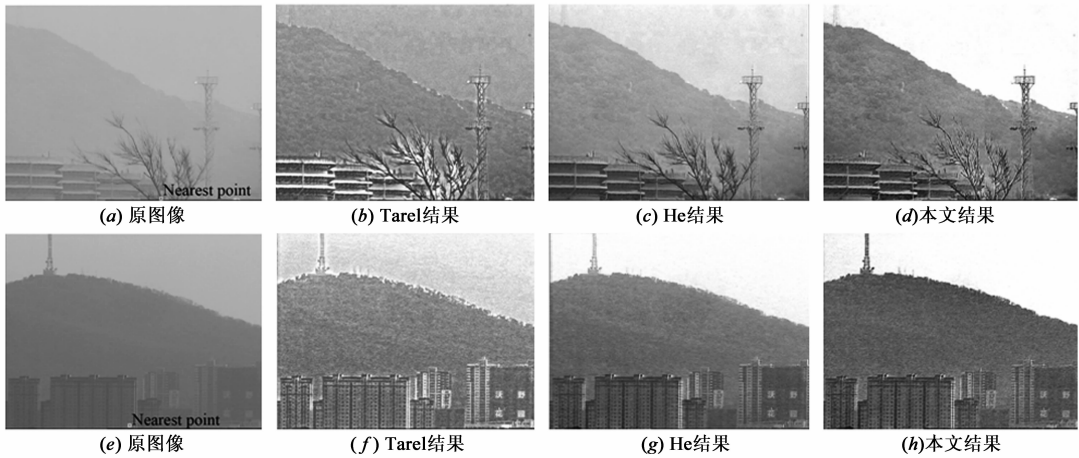


图7 第二组实验结果

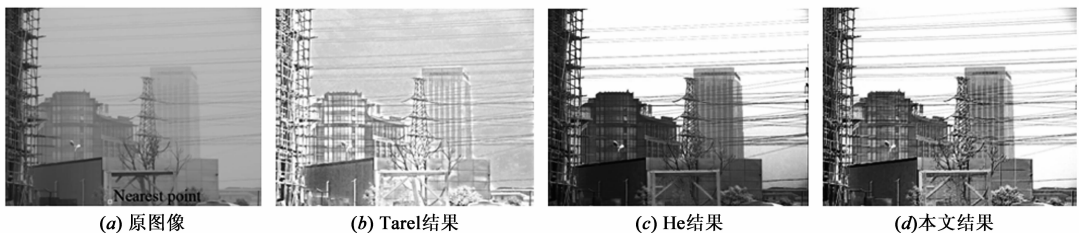


图8 第三组实验结果

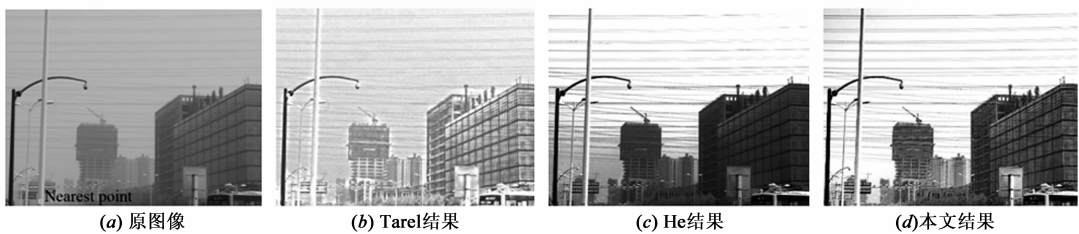


图9 第四组实验结果

为了进一步验证算法的有效性,本文同时对实验结果进行了定量统计分析,选取 TenenGrad 函数、Brenner 函数、方差函数、平方梯度函数、Vollath 函数、加窗梯度函数和熵函数等作为评价函数^[17].取图 6 第一组实验和图 7 第二组实验为例,对不同复原方法结果的对比分析分别如表 1 和表 2 所示.由表中可以看出,根据对图像的边缘信息和细节信息的定量统计,本文的复原结果相对于 Tarel 和 He 的结果总体要好,仅在个别函数处出现相对偏小值.

表 1 第一组实验不同复原方法结果比较

	1				2			
	原图	Tarel	He	本文	原图	Tarel	He	本文
TenenGrad 函数	5.13	31.79	44.37	100.00	10.73	30.99	35.75	100.00
Brenner 函数	7.60	46.66	56.24	100.00	8.46	36.15	39.26	100.00
方差函数	25.85	47.67	100.00	82.72	24.72	36.91	100.00	67.35
平方梯度函数	5.56	30.65	46.14	100.00	15.60	35.24	41.39	100.00
Vollath 函数	26.21	45.87	100.00	74.64	24.18	35.40	100.00	60.42
加窗梯度函数	4.51	29.71	50.50	100.00	12.44	34.71	40.82	100.00
熵函数	88.54	100.00	99.43	97.36	78.56	89.02	98.78	100.00

表 2 第二组实验不同复原方法结果比较

	1				2			
	原图	Tarel	He	本文	原图	Tarel	He	本文
TenenGrad 函数	6.05	42.51	45.27	100.00	3.88	84.56	82.97	100.00
Brenner 函数	6.24	49.72	46.93	100.00	3.78	91.91	78.24	100.00
方差函数	9.09	21.16	55.52	100.00	18.62	37.95	83.29	100.00
平方梯度函数	8.70	50.48	57.12	100.00	4.32	97.41	92.09	100.00
Vollath 函数	9.07	19.84	56.92	100.00	19.09	36.08	84.05	100.00
加窗梯度函数	5.45	45.75	58.37	100.00	2.74	96.76	97.96	100.00
熵函数	72.19	93.52	100.00	89.80	79.04	100.00	96.75	90.54

5 结束语

本文的目的在于解决大气非均匀路径中退化图像复原的问题,因此,本文依据大气非均匀路径中图像退化的光学模型,提出了一种新的降质图像复原算法,算法中重点给出了求解光学退化模型中表示视线路径非均匀性的比例因子项的方法.由于退化模型更符合成像时刻的实际大气状况,因此复原效果较好,实验结果证明了这一点.

需要指出的是,本文算法也存在一定的局限性,主要是因为复原算法中有两个假设:(1)假设每一个像素

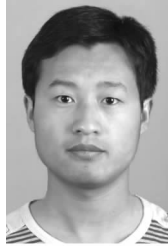
RGB 三通道的比例因子和大气透过率是相同的,这可能是造成图 6 第二帧复原结果颜色过饱和的原因之一;(2)假设最近目标处的天空背景亮度在到达观测点时经过的衰减相对于本身是较小的.这两个假设成立的条件以及怎样消除这两个假设还需要进一步研究.同时,利用暗原色先验知识求取成像场景中目标间的相对距离是粗糙的,如果能够得到更为精确的相对距离,甚至场景的真实距离则能够提高本文算法的有效性.此外,通过人工参与选择图像中包含天空区域的图像行和最近点也需要做进一步的改进,对于前者可通过有效的分割天空区域算法^[22]进行解决,而对于后者,根据暗原色先验知识得到的暗通道强度较小值对应的像素集将会给我们很有价值的启示.不过,虽然存在上述不足,但本文算法对于大气非均匀路径中退化图像的复原仍然具有较好的有效性.

参考文献

- [1] 饶瑞中.现代大气光学[M].北京:科学出版社,2012.
Rao Rui-zhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [2] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(5): 889 - 896.
- [3] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100 - 110.
- [4] 汪荣贵,朱静,杨万挺,等.基于照度分割的局部多尺度 Retinex 算法[J].电子学报,2010,38(5):1181 - 1186.
Wang Rong-gui, Zhu Jing, Yang Wan-ting, et al. An improved local multi-scale retinex algorithm based on illuminance image segmentation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(5): 1181 - 1186. (in Chinese)
- [5] Lutomirski R F. Atmospheric degradation of electrooptical system performance[J]. Applied Optics, 1978, 17(24): 3915 - 3921.
- [6] Sadot D, Kopeika N S. Imaging through the atmosphere: practical instrumentation-based theory and verification of aerosol modulation transfer function[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10(1): 172 - 179.
- [7] Kopeika N S, Sheayik T, Givati Z, et al. Restoration of satellite images based on atmospheric MTF[A]. Proceedings of Infrared Spaceborne Remote Sensing IV[C]. Denver, CO: SPIE, 1996, 2817: 106 - 117.
- [8] Yitzhaky Y, Dror I, Kopeika N S. Restoration of atmospherically blurred images according to weather predicted atmospheric modulation transfer functions[J]. Optical Engineering, 1997, 36(11): 3064 - 3072.
- [9] Rao Ruizhong. Equivalence of MTF of a turbid medium and ra-

- diative transfer field[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(2): 020101 - 1 - 020101 - 3.
- [10] McCartney E J. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles [M]. New York: JohnWiley and Sons, 1975.
- [11] Nayar S K, Narasimhan S G. Vision in bad weather[A]. Proceedings of the IEEE ICCV[C]. USA: IEEE, 1999, 2: 820 - 827.
- [12] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization - based vision through haze[J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 511 - 525.
- [13] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[A]. Proceedings of the IEEE CVPR[C]. USA: IEEE, 2008, 1: 1 - 8.
- [14] Fattal R. Single image dehazing[J]. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2008, 27(3): 1 - 9.
- [15] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[A]. Proceedings of the IEEE CVPR[C]. USA: IEEE, 2009, 1: 1956 - 1963.
- [16] Tarel J, Hauti N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[A]. Proceedings of the IEEE ICCV[C]. USA: IEEE, 2009. 2201 - 2208.
- [17] 方帅, 王勇, 曹洋, 等. 单幅雾天图像复原[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2279 - 2284.
Fang Shuai, Wang Yong, Cao Yang, et al. Restoration of image degraded by haze[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2279 - 2284. (in Chinese)
- [18] 饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2486 - 2492.
Rao Rui-zhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2486 - 2492. (in Chinese)
- [19] 武鹏飞, 徐青山, 方帅, 等. 大气非均匀路径中图像退化光学模型[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0501002 - 1 - 0501002 - 6.
Wu Peng-fei, Xu Qing-shan, Fang Shuai, et al. Optical model of image degradation in atmospheric inhomogeneous path[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0501002 - 1 - 0501002 - 6. (in Chinese)
- [20] Berk A, Anderson G P, Bernstein L S, et al. MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction[J]. Proceedings SPIE Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III, 1999, 3756: 348 - 353.
- [21] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W, et al. A numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered medium[J]. Applied Optics, 1998, 27(12): 2502 - 2509.
- [22] Hoiem D, Efros A A, Hebert M. Recovering surface layout from an image[J]. IJCV, 2007, 75(1): 151 - 172.

作者简介



武鹏飞 男. 1987年4月出生, 山东曲阜人. 2004年毕业于中国石油大学(华东)物理科学与技术学院, 获理学学士学位. 现为中国科学院安徽光学精密机械研究所硕博连读生. 主要从事大气中图像退化机理和图像复原、光谱与偏振滤波等方面的研究工作.

E-mail: wupengfei422@126.com



方帅 女. 1978年1月出生, 安徽寿县人. 副教授、硕士生导师. 1998年、2002年、2005年和2012年分别在淮南矿业学院、沈阳建筑工程学院、东北大学和中国科学院安徽光学精密机械研究所获工学学士、工学硕士、工学博士学位和博士后. 主要研究领域是计算机视觉及视觉与光学的交叉领域.